

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«МИРЭА – Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА»

ЛЕКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конфиденциальная информация и ее защита в документационном обеспечении управления

Электроника

Уровень бакалавриат
Форма обучения очная

Направление
подготовки 10.03.01 Информационная безопасность

Институт комплексной безопасности и специального приборостроения

Кафедра кафедра электроники

Лектор д.т.н., профессор Филинов В.В.

Используются в данной редакции с учебного года 2020/21

Проверено и согласовано «_____» _____ 20____ г. _____
(подпись директора Института Филиала
с расшифровкой)

Москва 2020г.

4. ОСНОВЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

4.1. Общие сведения и основные понятия

Трудно найти область современного производства, где бы не использовались методы и средства контрольно-измерительной техники. Значение измерений и контроля в настоящее время возросло и в связи с широкой автоматизацией технологических процессов в различных областях промышленности. Особенная роль принадлежит электроизмерительной технике, которая имеет ряд преимуществ по сравнению с другими средствами: относительную простоту проведения измерений, высокую точность, чувствительность, быстроедействие, возможность передачи информации на большие расстояния, возможность сочетания с электронными средствами, ЭВМ и др.

Электроизмерительная техника применяется в современном производстве не только для получения информации о тех или иных электрических и неэлектрических физических величинах, но и для автоматизации контроля и управления производственными процессами.

Измерение – это определение значений физических величин опытным путём при помощи специальных технических средств и выражение этих значений в принятых единицах. На производстве также широко применяются более производительная операция измерений – контроль.

Электроизмерительный прибор – это средство электрических измерений, которое предназначено для выработки сигнала измерительной информации, т. е. сигнала, который функционально связан с измеряемой физической величиной, в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительный преобразователь – это основная часть измерительного прибора, в котором сигнал преобразуется в вид, удобный для подачи на индикаторные или регистрирующие устройства.

В зависимости от вида измеряемых величин измерительные преобразователи делятся на две группы: преобразователи электрических величин в электрические (шунты, делители напряжения, усилители и т.д.) и преобразователи неэлектрических величин в электрические (термо- и тензорезисторы, индуктивные преобразователи и т.д.).

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывными функциями измеряемых величин, называются **аналоговыми приборами**.

Электроизмерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации, показания которых представлены в цифровой форме, называют **цифровыми приборами**.

По методам измерения различают электроизмерительные приборы **непосредственной оценки и приборы сравнения**. В первых измеряемую величину определяют по показанию прибора, шкала которого проградуирована в соответствующих единицах. Во вторых – измеряемая величина сравнивается с известной величиной (мосты, компенсаторы).

4.2 Характеристики измерительных приборов

Основными характеристиками являются диапазон измерений, чувствительность, порог чувствительности, потребляемая мощность, погрешности.

Диапазон измерений – область значений измеряемой величины X , для которой нормированы допустимые погрешности. Эта область ограничена пределами измерений – наибольшими и наименьшими значениями диапазона измерений.

Чувствительностью s аналогового электроизмерительного прибора к измеряемой величине X называется производная от перемещения указателя по измеряемой величине X . У обширной группы электроизмерительных приборов указатель имеет угловое перемещение. Для этих приборов чувствительность определяется как производная от угла отклонения α указателя по измеряемой величине X , т. е.

$$s = d\alpha / dX = F(X),$$

Если функция $F(X) = const$, то прибор имеет равномерную шкалу, в противном случае шкала неравномерная. Данное определение не распространяется на интегрирующие приборы (счётчики).

Чувствительность прибора не следует смешивать с **порогом чувствительности**, под которым понимают наименьшее изменение показания прибора.

Потребляемая мощность характеризует экономические возможности прибора: чем меньше потребляемая мощность, тем выше качество прибора, так как потребляемая мощность нарушает режим исследуемой цепи и это приводит к погрешностям измерений.

Погрешность измерения – это качество измерения, характеризующее отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Погрешности классифицируются по следующим признакам:

по источнику погрешности: методические и инструментальные. Методические погрешности обусловлены несовершенством метода измерения и не зависят от средств измерения. Инструментальные погрешности вызваны несовершенством средств измерения и не зависят от метода измерения;

по взаимной корреляции значений: на систематические, прогрессирующие и случайные. Систематические погрешности можно считать неизменными во времени; прогрессирующие погрешности изменяются во времени по определённому закону; случайные погрешности принимают различные произвольные значения, однако часто можно найти регрессионные зависимости, соответствующие совокупностям случайных значений погрешностей; по форме нормирования: абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютная погрешность измерения определяется как разность результата измерения Y и истинного значения измеряемой величины X , т. е. $\Delta = X - Y$.

Абсолютная погрешность имеет размерность измеряемой величины и часто неудобна для сравнения метрологических характеристик различных средств и методов измерений. Поэтому пользуются безразмерными формами оценки погрешности: относительной и приведенной погрешностями.

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta / X \approx \Delta / Y .$$

Приведённая погрешность – это отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению измеряемой величины (нормирующее значение для большинства приборов – это диапазон измерения по шкале):

$$\gamma = \Delta / (X_{\text{МАКС}} - X_{\text{МИН}})$$

Если

$$X_{\text{МИН}} = 0, \text{ то } \gamma = \Delta / X_{\text{МАКС}} = \delta_{\text{МИН}} .$$

В паспорте измерительного прибора приводится значение приведенной погрешности, выраженное в процентах.

Это значение округляется до одного из чисел 4,0; 2,5; 1,5; 1,0; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05, которое называется **классом точности**. Класс точности является обобщенной метрологической характеристикой средства измерения, определяющей доступные пределы всех погрешностей. Так, 0,1 означает, что погрешность измерения составляет $\pm 0,1\%$.

4.3. Измерительные механизмы аналоговых приборов

4.3.1. Особенности аналоговых приборов

Аналоговые приборы отличаются относительной простотой, высокой надежностью, выпускаются с классами точности до 0,05 включительно. По конструктивному исполнению их можно разделить на электромеханические и электронные приборы.

Электромеханический прибор состоит из измерительной цепи, измерительного механизма и вспомогательных элементов. Измерительная цепь служит для преобразования измеряемой величины в другую, непосредственно воздействующую на измерительный механизм. В измерительном механизме электрическая энергия преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части, обычно в угловое перемещение. К вспомогательным элементам относится стрелка, шкала, корпус прибора и другие устройства.

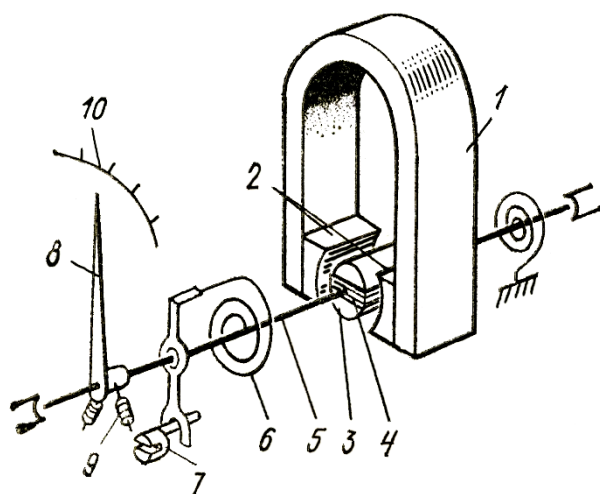


Рис. 4.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм

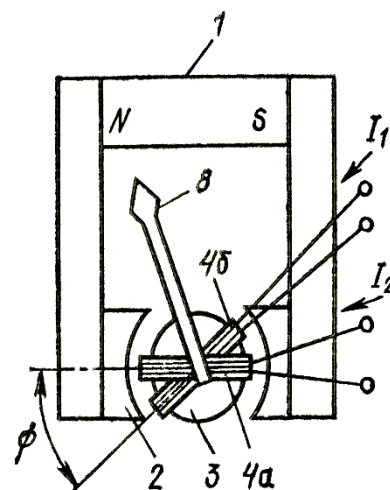


Рис.4.2. Магнитоэлектрический логометр

По принципу действия и конструкции электромеханические измерительные механизмы делятся на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, электростатические, индукционные, тепловые, выпрямительные, термоэлектрические. Рассмотрим основные типы измерительных механизмов.

4.3.2. Магнитоэлектрический измерительный механизм

Принцип действия магнитоэлектрического измерительного механизма (рис. 4.1) основан на силовом взаимодействии постоянного магнитного поля и проводника с постоянным током.

На концах постоянного магнита 1 закреплены полюсные наконечники 2, между которыми помещен неподвижный цилиндр 3. Полюсные наконечники и неподвижный цилиндр выполнены из магнитно-мягкого материала. Такая конструкция магнитной системы позволяет получить в зазоре между полюсными наконечниками 2 и цилиндром 3 равномерное радиальное постоянное магнитное поле. В этом поле находится подвижная катушка 4, которая чаще всего наматывается на алюминиевый каркас, одновременно выполняющий роль электромагнитного ускорителя подвижной системы. Подвижная катушка 4 крепится на полуосях 5 или растяжках. Измеряемый постоянный ток поступает в катушку через спиральные пружины 6, которые создают противодействующий момент. Кроме того, вспомогательными элементами конструкции магнитоэлектрического измерительного прибора являются: 7 – устройство установки нулевого положения указателя-стрелки 8, 9 – балансир, 10 – шкала.

В результате взаимодействия магнитного поля в зазоре с током в катушке создается вращающий момент, под действием которого подвижная катушка поворачивается на полуосях 5. Отклонение катушки будет продолжаться до тех пор, пока вращающий $M_{вр}$ не уравнивается

противодействующим моментом $M_{\text{пр}}$. При этом стрелка δ отклонится на угол α , пропорциональный току в катушке.

Вращающий момент измерительного механизма определяется в соответствии с законом электромагнитной силы:

$$M_{\text{вр.}} = F_{\text{эм}} d = B l \omega d = B S \omega I,$$

где $F_{\text{эм}}$ – электромагнитная сила; B – индукция в зазоре; d, l – ширина и длина катушки;

S – площадь катушки; ω – число витков катушки; I – ток в катушке.

Из равенства $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$ следует:

$$B S \omega I = k \alpha,$$

где $M_{\text{пр}} = k \alpha$ – противодействующий момент; k – коэффициент пропорциональности.

Из последнего выражения видно, что зависимость

$$\alpha(I) = \frac{B S \omega}{k} I = s I$$

линейная и чувствительность $s = \partial \alpha / \partial I$ постоянная вдоль всей шкалы, что является одним из важных достоинств магнитоэлектрического механизма.

Другим магнитоэлектрическим механизмом является **логометр**, у которого противодействующий момент создается не механическим, а электрическим способом. Подвижная часть логометра (рис. 4.2) состоит из двух жестко скрепленных между собой катушек 4а и 4б (остальные обозначения те же, что на рис. 4.1). Направление токов в катушках выбирают так, чтобы их вращающие моменты противодействовали друг другу. Магнитное поле в межполюсном зазоре должно быть неравномерным, что обеспечивается специальной формой полюсных наконечников 2 (например, эллиптической).

При установившемся отклонении подвижной системы прибора $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, т.е.

$$B(\alpha) S_1 \omega_1 I_1 = B(\alpha - \psi) S_2 \omega_2 I_2,$$

где ψ – угол между катушками, или

$$B(\alpha - \psi) S_2 \omega_2 / B(\alpha) S_1 \omega_1 = I_1 / I_2$$

Из последнего выражения следует, что отклонение стрелки логометра

$$\alpha = f(I_1 / I_2)$$

пропорционально отношению токов в катушках. Если цепи токов I_1 и I_2 питаются от одного и того же источника, то показания логометра независимы от колебаний напряжения источника. Поэтому, как показано ниже, можно пользоваться магнитоэлектрическим логометром для измерения сопротивлений резисторов, а также неэлектрических величин, которые могут быть преобразованы в сопротивления.

Магнитоэлектрические механизмы относятся к числу **наиболее точных** (класс точности до 0,1 включительно). Благодаря сильному собственному магнитному полю влияние посторонних полей на показание прибора весьма незначительно. По чувствительности магнитоэлектрический механизм **не имеет себе равных**. Известны магнитоэлектрические микроамперметры с током полного отклонения 0,1 мкА, например типа М95, класса точности 1,0.

Магнитоэлектрические приборы непосредственно могут применяться для измерений только **в цепях постоянного тока**. Для измерения в цепях переменного тока необходимо дополнительно включать различного рода преобразователи.

4.3.3. Электромагнитный измерительный механизм

Принцип действия электромагнитных измерительных механизмов (рис. 4.3) основан на действии магнитного поля неподвижной катушки *1* с током *I* на сердечник *2* из магнитно-мягкого материала, находящийся в этом поле. Сердечник *2*, эксцентрично закрепленный на оси *3*, намагничивается и втягивается в щель катушки. Сила, действующая на сердечник, создает вращающий момент $M_{вр.}$ противодействующий момент $M_{пр} = k\alpha$ обеспечивается спиральной пружиной *4*. При равенстве вращающего и противодействующего моментов угол отклонения α стрелки *5* пропорционален току *I* в катушке *1*. Для ослабления колебаний стрелки механизм имеет воздушный ускоритель *6*.

При обратном направлении тока в катушке меняются местами магнитные полюсы сердечника и сердечник по-прежнему втягивается. Следовательно, механизм пригоден для измерения в **цепях постоянного и переменного токов**.

Вращающий момент электромагнитного измерительного механизма

$$M_{вр} = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{d(LI^2/2)}{d\alpha} = \frac{I^2}{2} \frac{dL}{d\alpha},$$

где W_M – энергия магнитного поля катушки; L – индуктивность.

При равенстве вращающего и противодействующего моментов

$$(I^2/2)dL/d\alpha = k\alpha,$$

откуда определяется функциональная зависимость угла отклонения стрелки от значения тока:

$$\alpha = \frac{I^2}{2k} \frac{dL}{d\alpha}.$$

Из последнего выражения видно, что шкала прибора с электромагнитным измерительным механизмом **нелинейная**. Подбором формы сердечника *2* добиваются того, чтобы изменение производной $dL/d\alpha$ по возможности компенсировало нелинейность зависимости $\alpha(I)$. В реальных измерительных приборах начальный нелинейный участок составляет 20 – 25 % всей шкалы и часто не градуируется. Это уменьшает чувствительность механизма.

К достоинствам электромагнитного механизма следует отнести: простоту конструкции, способность выдерживать большие перегрузки, что объясняется отсутствием токоподводов к подвижной части, пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного токов без дополнительных

преобразователей. Основные недостатки – малые точность и чувствительность.

4.3.4. Электродинамический измерительный механизм

Принцип действия электродинамического измерительного механизма основан на действии магнитного поля, создаваемого током в неподвижной катушке, на проводник с током подвижной катушки, и наоборот.

Устройство такого измерительного механизма представлено на рис. 4.4. Токи I_1 и I_2 в подвижной 1 и неподвижной 2 катушках создают магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . В результате действия магнитного поля на подвижную катушку, закрепленную на оси, она стремится занять такое положение, при котором направление ее магнитного потока Φ_1 совпадает с направлением магнитного потока неподвижной катушки Φ_2 .

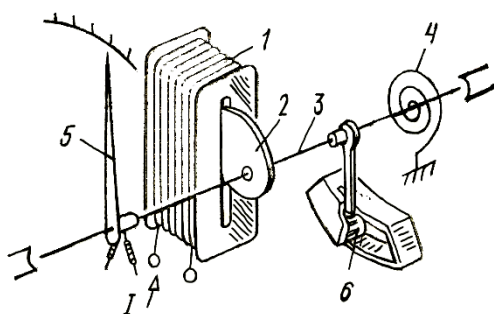


Рис. 4.3. Электромагнитный измерительный механизм

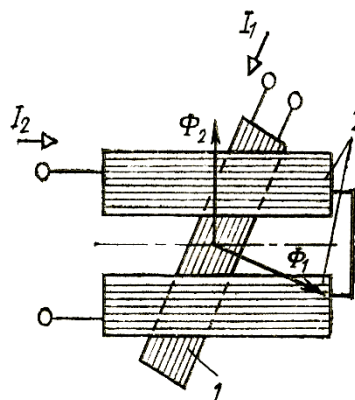


Рис. 4.4. Электродинамический измерительный механизм

Сила, действующая при этом на катушку 1, создает вращающий момент

$$M_{вр} = \frac{dW_M}{d\alpha} = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha},$$

где M – взаимная индуктивность катушек.

Вращающий момент электродинамического измерительного механизма пропорционален произведению токов в катушках и скорости изменения взаимной индуктивности M при повороте подвижной катушки; поэтому шкала прибора нелинейная.

Электродинамический механизм, как и другие, включают в цепь для измерения **токов и напряжений**. Кроме того, такой механизм с двумя катушками можно применить для измерения **мощности**.

Логометр электродинамической системы имеет одну неподвижную катушку и две жестко скрепленные между собой подвижные катушки, одна из которых аналогично логометру магнитоэлектрического механизма необходима для создания противодействующего момента. Можно показать,

что при неизменном отношении действующих значений токов подвижных катушек угол отклонения стрелки логометра пропорционален сдвигу фаз между этими токами, поэтому логометры с электродинамическим механизмом чаще всего применяют в качестве **фазочувствительных приборов (фазометров)**.

Электродинамические измерительные механизмы могут быть частью самых **точных** современных приборов для измерений в цепях переменного тока, так как у них нет сердечников из ферромагнитных материалов и, следовательно, исключены погрешности, связанные с появлением вихревых токов и гистерезисом.

Электродинамические приборы изготавливаются главным образом в виде переносных приборов **высокой точности** – классов 0,1; 0,2 и 0,5, а в качестве щитовых приборов применяются редко. Их недостатками являются: относительно большое потребление мощности, чувствительность к механическим воздействиям (толчкам, тряске и вибрациям).

4.3.5. Электростатический измерительный механизм

В электростатических измерительных механизмах вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводящих пластин, одна из которых подвижная. Из принципа работы этих механизмов следует, что они непосредственно могут измерять только напряжение, т.е. применяться в вольтметрах. Шкала электростатических вольтметров квадратичная.

Электростатические измерительные механизмы применяются в **маломощных цепях** для измерения напряжений до десятков и сотен киловольт в широком диапазоне частот (20 Гц – 30 МГц) без применения громоздких резисторов, имеющих большую мощность потерь. По точности эти приборы соответствуют чаще всего классам 1,0; 1,5; 2,5.

4.3.6. Индукционный измерительный механизм

Индукционный измерительный механизм (рис. 4.5) применяется только в **цепях переменного тока**, чаще всего в качестве **счетчиков электроэнергии**.

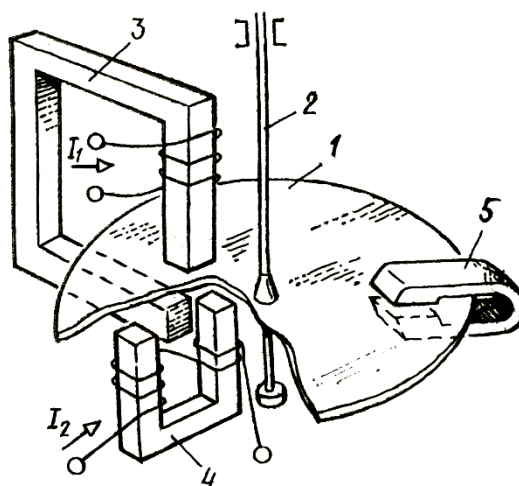


Рис. 4.5. Индукционный измерительный механизм

Таблица 4.1. Условные обозначения на шкалах приборов

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Магнитоэлектрический прибор		Термоэлектрический прибор	
Логометр магнитоэлектрический		Постоянный ток	—
Электромагнитный прибор		Переменный ток	~
Прибор электродинамический		Постоянный и переменный ток	≈
Логометр электродинамический		Вертикальное положение шкалы	┐
		Горизонтальное положение шкалы	┌
		Изоляция испытана на напряжении 2 кВ	☆ 2

Прибор индукционный		Защита от внешних магнитных полей	
Прибор электростатический		Защита от внешних электрических полей	
Прибор выпрямительной системы			

Принцип работы этого измерительного механизма основан на взаимодействии магнитного поля с вихревыми токами в немагнитном металлическом диске 1, укрепленном на оси 2. Магнитный поток электромагнита 3 взаимодействует с вихревыми токами, возбуждаемыми электромагнитом 4, и наоборот. Один из потоков пропорционален напряжению цепи, другой – току. Вращающий момент зависит от напряжения тока и угла сдвига фаз между ними. Постоянный магнит 5 создает тормозной момент. Чем больше ток и напряжение, тем больше магнитные потоки электромагнитов и тем больше частота вращения диска n , которая пропорциональна активной мощности P и времени t , в течение которого протекает ток, т.е. пропорциональна расходу электроэнергии $W = P t = cn$, где c - коэффициент, зависящий от конструкции счетчика (постоянная счетчика).